

MATERIA-ANTIMATERIA: una simmetria imperfetta

Marco Napolitano

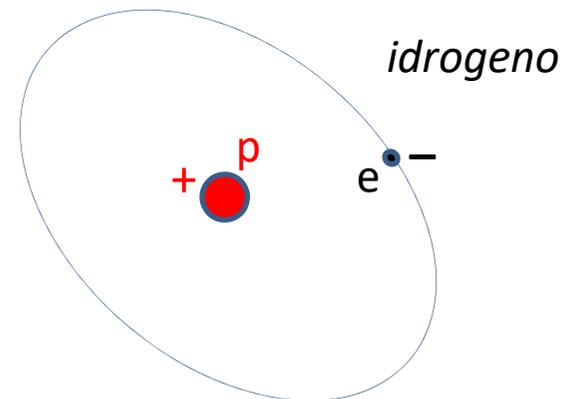
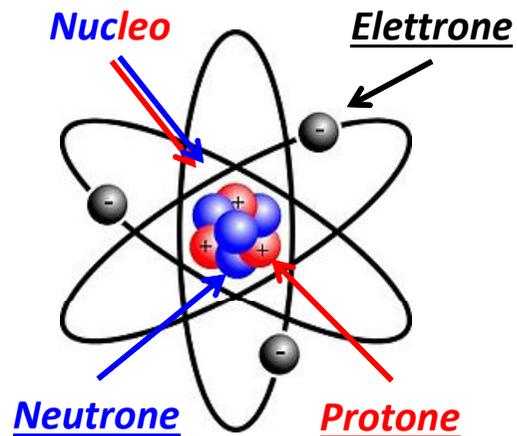
Università "Federico II" – Napoli e INFN Sezione di Napoli

Atomi: aggregati di tre distinte particelle

- **Protone**
- **Neutrone**
- **Elettrone**

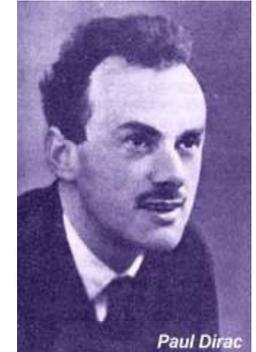
	<i>Carica</i>	<i>Massa</i>
Protone	$+e$	$\approx 2000 \times m_e$
Neutrone	0	$\approx 2000 \times m_e$
Elettrone	$-e$	m_e

$(e = 1,6 \times 10^{-19} C , m_e \simeq 10^{-30} kg)$



1928 Il fisico inglese Paul Adrien Maurice DIRAC (nobel 1933) sviluppò una equazione quantistica relativistica che

- **Rendeva conto di caratteristiche importanti dell'elettrone**
- **Ne descriveva in modo straordinariamente esatto il comportamento in presenza di un campo elettromagnetico**



Però, possibili soluzioni apparentemente senza significato rischiavano di vanificare quanto c'era di buono

Per dare significato a tali soluzioni, Dirac ipotizzò l'esistenza di "una copia in negativo" dell'elettrone: **il positrone**

Una precisa corrispondenza tra proprietà dell'elettrone e del positrone, in particolare

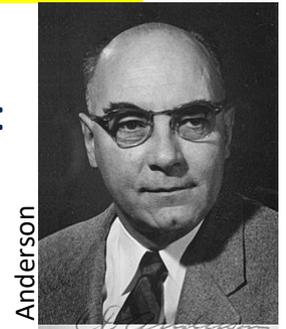
- *masse esattamente uguali*
- *cariche uguali in modulo ma di segno opposto*

Dalla teoria alla “pratica”

- 1932 – Carl D. Anderson (nobel 1936) esponendo una camera a nebbia ai raggi cosmici, scopre il **positrone**. Il positrone è l’antiparticella dell’elettrone: **antielettrone**
- Subito chiaro che: **una antiparticella per ogni particella**
 - protone → **antiprotone** (\bar{p})
 - 1955 – Owen Chamberlain e Emilio Segré (nobel 1959) et al. “producono” e rivelano l’antiprotone

Come per l’elettrone, c’è una precisa corrispondenza tra proprietà di una particella e della sua antiparticella, in particolare

- *masse esattamente uguali*
- *cariche uguali in modulo ma di segno opposto (non solo la carica elettrica)*
- Così, anche neutrone → **antineutrone** (\bar{n})
 - 1956- Oreste Piccioni et al. “producono” e rivelano l’antineutrone.



Anderson



Segré

Chamberlain

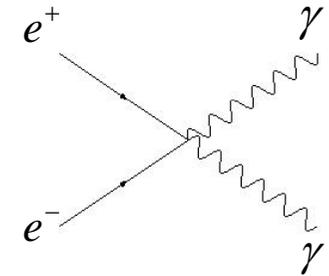
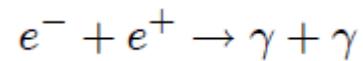


Piccioni

Antielettrone, antiprotone, antineutrone → antiatomi

Annichilazione e creazione di coppie particella-antiparticella

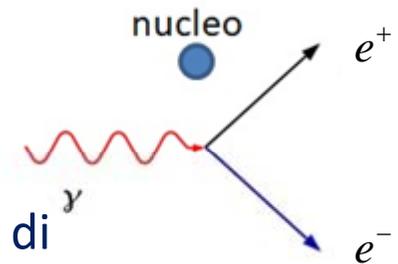
- Le cariche opposte fanno sì che **particella e antiparticella si annichilino**



- L'annichilazione protone-antiprotone produce:
 - ~ 10 volte l'energia della fissione di un nucleo di uranio
 - ~ 100 volte l'energia della fusione di un nucleo di trizio e uno di deuterio
 - Più di un milione di miliardi di volte dell'energia prodotta dalla combustione di un atomo di carbonio

- Processo inverso dell'annichilazione particella -antiparticella:
creazione di una coppia particella-antiparticella

- La coppia è prodotta “trasferendo al vuoto” una quantità di energia almeno pari a $2mc^2$
- *Il vuoto è una sorta di contenitore dal quale possiamo estrarre, pagando il giusto prezzo in energia, tutte le coppie particella-antiparticella che vogliamo*

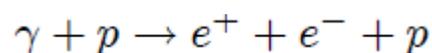
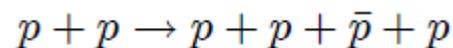


Uno scettico: realtà o fantascienza?

Qualcuno potrebbe chiedere: *è proprio vero? C'è sul serio l'antimateria o è "roba" da fantascienza? ... motori ad antimateria bombe ad antimateria..!!*

- Sì l'antimateria esiste! ... non la propulsione non le bombe ...
- In laboratori, quale il CERN, coppie particella-antiparticella vengono create facendo collidere tra loro o con bersagli particelle di alta energia.

Esempi:



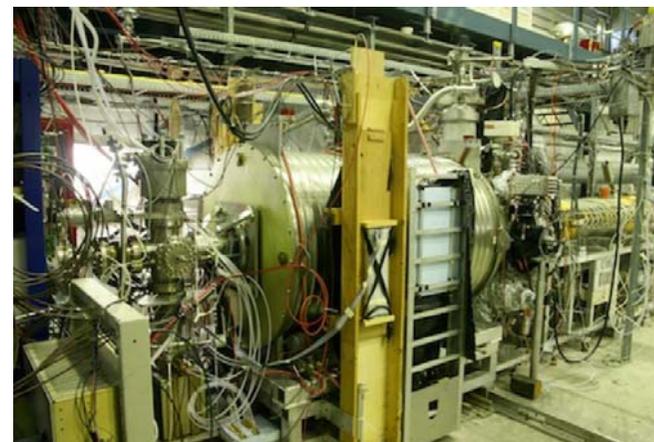
- 1995: creato al CERN il primo atomo di anti-idrogeno!

Il problema è come accumularli e conservarli



Trappole elettromagnetiche

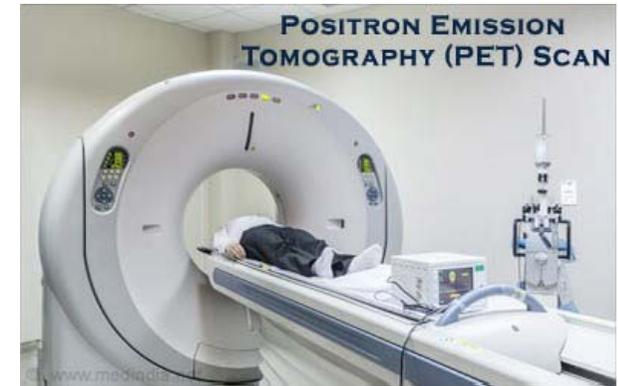
- 2011 ALPHA al CERN intrappola e conserva per 17 min oltre 300 atomi di anti-idrogeno
- TRAP al CERN ha mantenuto intrappolato un antiprotone per 57 giorni facendo precise misure della massa e della carica elettrica



Lo scettico “quasi” convinto

*OK! Ci credo, l'antimateria esiste! Però mi pare “roba per farci giocare I fisici”.
Come può interessare “la vita reale”?*

- Intanto, seppure limitatamente agli antielettroni, è presente nella materia ordinaria
 - Per es. una banana “produce” antiparticelle!
Circa un positrone ogni 75 minuti da potassio-40
 - ... circa 180 positroni all'ora in una persona di 80 kg...
- ... e la PET!
- Ancora:
 - **ACE al CERN ha studiato la possibilità di usare gli antiprotoni a scopi medicali**



Una curiosità

- Nel 2000 fu fondata in USA “Hbar Technologies”. Scopo “produzione commerciale e uso di antiprotoni”

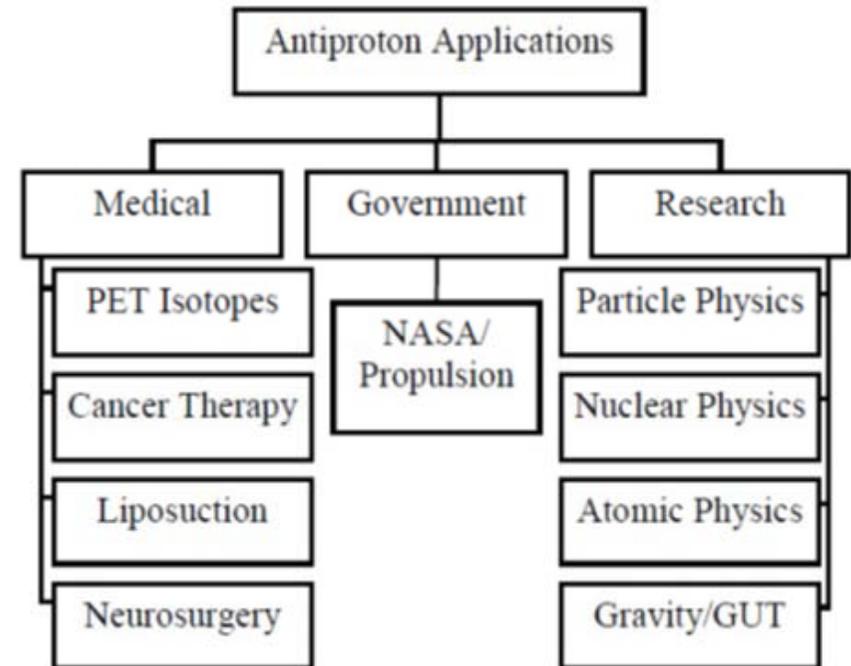
Niente bombe!

- *Il CERN ha prodotto finora ~10 ng di antimateria! Potendola avere tutta insieme e farla annichilare si potrebbe far accendere una lampadina da 60W per 4 ore!*)*

Per produrne un grammo a questo ritmo)*

- ~1 miliardo di anni
- ~25 milioni di miliardi di kWh

*) <http://angelsanddemons.web.cern.ch/antimatter/making-antimatter>



(G. Jackson: Commercial production and use of antiprotons, Proceedings of EPAC 2002, Paris, France)

- La teoria di Dirac è perfettamente simmetrica se eseguiamo la seguente operazione :
 - **Scambiamo la particella con l'antiparticella** (e invertiamo i segni dei campi elettrici e magnetici)

È una *trasformazione di simmetria* e si chiama **coniugazione di carica (C)**

Prima di illustrare C vediamo cosa si intenda in fisica per simmetria

- ***Le simmetrie in fisica sono quelle che presentano le leggi fondamentali che governano i processi fisici e sono collegate a ciò che possiamo fare , per esempio, a un determinato processo o a un esperimento lasciandolo invariato***

I principi di simmetria svolgono un ruolo importante rispetto alle leggi della natura delle quali riepilogano le regolarità indipendenti dalle specifiche dinamiche.

Difficile immaginare che molti progressi potrebbero essere stati fatti per dedurre le leggi della natura senza l'esistenza di certe simmetrie

Semplici esempi di principi di invarianza:

- Invarianza per traslazioni nello spazio
- Invarianza per traslazioni nel tempo

Coniugazione di carica

- C applicata, per esempio, ad uno stato di una o più particelle e/o antiparticelle inverte la carica elettrica e qualunque altra carica di ciascuna lasciando, però, invariate tutte le altre grandezze fisiche che caratterizzano lo stato

*C trasforma, per esempio, un elettrone in antielettrone, un neutrone in antineutrone **ma fa anche il viceversa***

Un atomo di materia è fatto di protoni, neutroni ed elettroni; il corrispondente antiatomo, ottenuto dal primo applicando C, è fatto di antiprotoni, antineutroni e antielettroni (positroni) nella stessa configurazione dinamica del primo

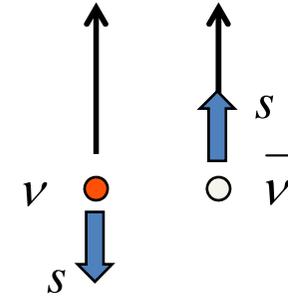
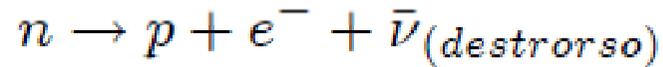
- **Se le leggi fisiche fossero invarianti sotto C si avrebbe una perfetta simmetria tra materia e antimateria**

Rifletterebbe l'arbitrarietà con la quale definiamo il segno della carica elettrica

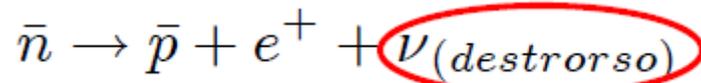
Seguendo Feynman chiediamoci: *“Sapremmo fornire ad un ipotetico extraterrestre di una lontana galassia (via, per esempio, un ipotetico telefono) una prescrizione che gli permettesse di individuare come carica negativa ciò che noi definiamo tale e, quindi, **come materia** ciò che noi intendiamo come tale?”* **NO se C è esatta!**

C è violata dalle interazioni deboli

- Consideriamo per esempio il decadimento del neutrone



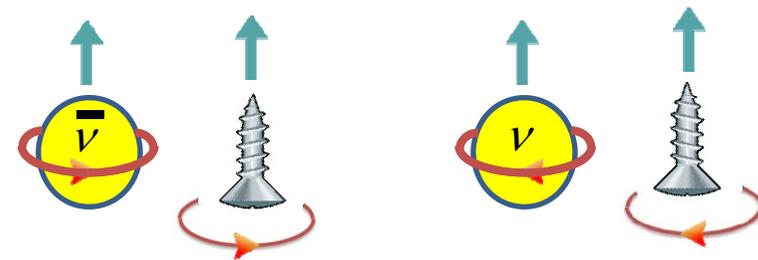
- Applichiamo C. Otteniamo



Non esiste. C è violata!

Il processo corretto è: $\bar{n} \rightarrow \bar{p} + e^{+} + \nu_{(sinistrorso)}$

Vediamola così, anche se ...



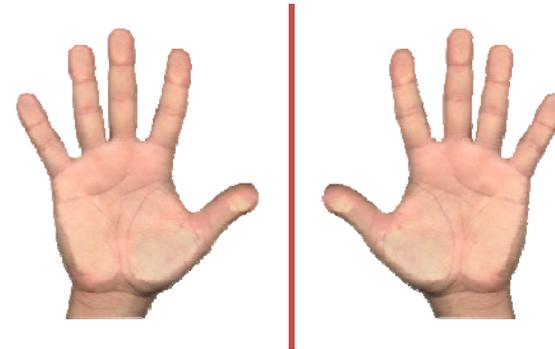
- Il problema di comunicazione con il nostro extraterrestre **semberebbe risolto!**

“Il neutrone è quello dal cui decadimento emerge un neutrino destrorso”

Se il neutrino è sinistrorso allora si tratta di un antineutrone!

- Però c'è un problema:

“destra” e “sinistra” costituiscono una definizione assoluta? O, anche: “destrorso” e “sinistrorso” costituiscono una definizione assoluta o è semplicemente una questione di convenzione



- Seguiamo ancora Feynmann e mettiamola così:

“Sapremmo fornire ad un ipotetico extraterrestre di una lontana galassia (via, per esempio, un ipotetico telefono) una prescrizione che gli permettesse di individuare come destrorso ciò che noi definiamo tale?”

- Qui entra in gioco un'altra simmetria: **la parità**

- Trasformazione di parità (P): **inversione delle coordinate**
Equivalente a: **riflessione + rotazione**
Possiamo limitarci alla riflessione

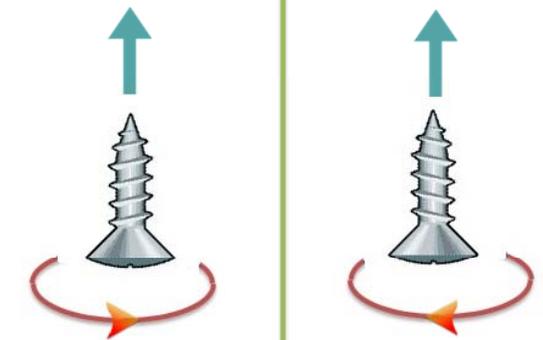
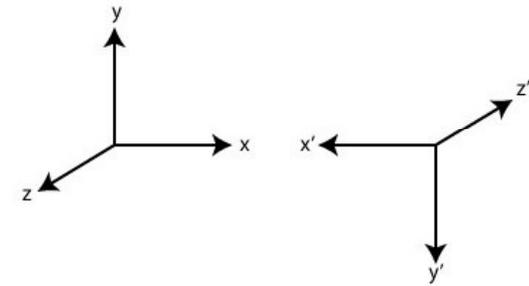
- Invarianza per parità: *un esperimento realizzato con un apparato costruito uguale all'immagine di un altro dà lo stesso risultato di quest'ultimo*

La sveglia immagine segna esattamente lo stesso tempo dell'originale

- Invarianza per parità collegata all'impossibilità di una definizione assoluta di destra e sinistra

né di destrorso e sinistrorso, visto che

P trasforma una vite destrorsa in una sinistrorsa.



Attenzione, questo non significa che il nostro mondo presenti una simmetria destra-sinistra né che ognuno di noi non sia in grado di indicare cosa intendiamo con destra e cosa con sinistra!



D

S

I modi con i quali possiamo distinguere destra da sinistra avrebbero lo stesso valore se avessimo adottato la convenzione opposta.

Il punto, infatti, è se possiamo o non possiamo distinguere in modo assoluto destra e sinistra o verso orario e antiorario!

Se P fosse una simmetria esatta delle leggi fisiche **non saremmo in grado** di far sapere al nostro “extraterrestre” cosa intendiamo con mano destra e cosa con sinistra né cosa sia rotazione oraria e cosa antioraria

In realtà



T. D. Lee



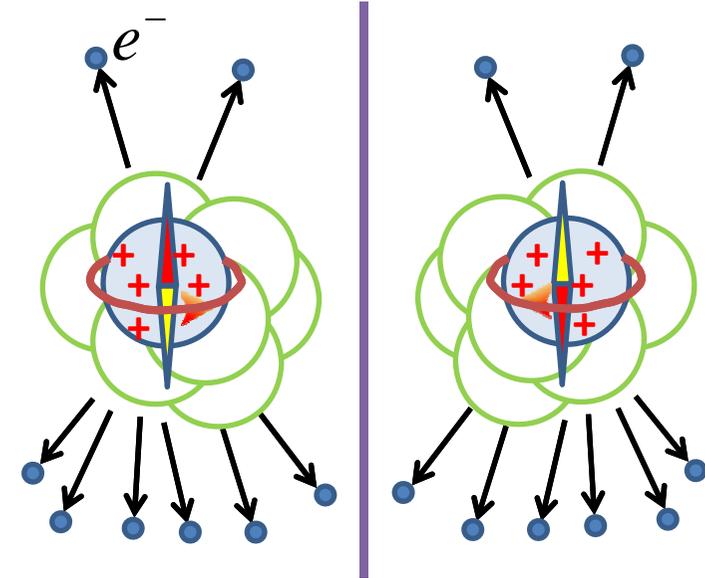
C. N. Yang



C. S. Wu

P è violata dalle interazioni deboli

- 1956 **Tsung-Dao Lee e Chen-Ning Yang** (nobel 1957) misero in discussione l'invarianza sotto P e suggerirono possibili verifiche sperimentali
- Seguendo le indicazioni di Lee e Yang, Chien-Shiung Wu e coll. realizzarono un esperimento con il quale studiavano la distribuzione spaziale degli elettroni di decadimento del ^{60}Co



La simmetria di riflessione è violata!

- Fu uno dei maggiori eventi scientifici del '900

"Ricordo una mia lettera Pauli in risposta scrisse che avrebbe scommesso qualsiasi somma di denaro che la parità si conserva in qualsiasi processo. appreso la notizia che la parità era ampiamente non conservata. Pauli rimase completamente sbalordito. Mi scrisse esprimendo la sua meraviglia per il fatto che "Dio è debolmente mancino",

(Weisskopf: Il privilegio di essere un fisico, Jaca Book 1994.)

Lo “specchio” CP

Riprendiamo

$$n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}_{(destrorso)}$$

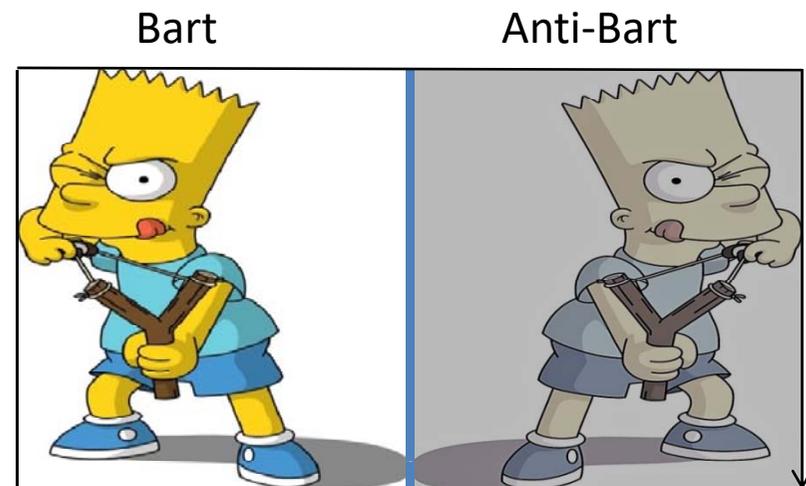
e ricordiamo che applicando C troviamo

$$\bar{n} \rightarrow \bar{p} + e^{+} + \nu_{(destrorso)}$$

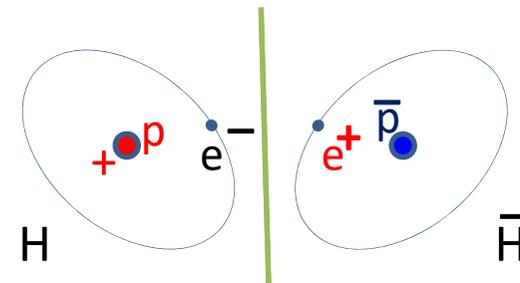
Se ora applichiamo anche P troviamo

$$\bar{n} \rightarrow \bar{p} + e^{+} + \nu_{(sinitrorso)}$$

E' CP la simmetria materia-antimateria!



CP è uno specchio immaginario che, oltre a trasformare la destra in sinistra, inverte tutte le cariche



CP è una simmetria esatta?

- Se CP fosse esatta, materia e antimateria sarebbero intrinsecamente indistinguibili.
- Una simmetria esatta ovunque e comunque si verifici, pur potendo essere bella, è anche noiosa. Ricordo Bruno Zevi fare un elogio dell'asimmetria in architettura!

Ma lo è?



In fisica una simmetria esatta si collega semplicemente ad una grandezza non misurabile

Il suo maggiore interesse sta nella speranza che guardandoci bene si finisca col trovare una piccola imperfezione la quale, però, apra una nuova finestra sul mondo fisico.

- Una piccola “crepa” nello specchio di CP fu trovata nel 1964 da James Watson Cronin e Val Logstone Fitch e collaboratori

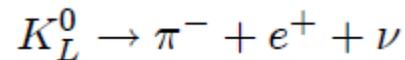
Evviva!

La “crepa” è piccola ma di grande importanza: è argomento di ricerca da mezzo secolo!

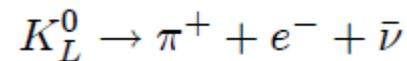
Violazione di CP

- Cronin e Fitch (nobel 1980) trovarono una piccola violazione di CP nel decadimento del mesone K (kaone) neutro in mesoni π (pioni)

Vediamola in

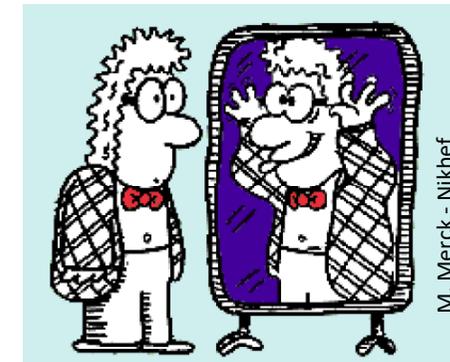


Allo “specchio” CP questo processo si trasforma in



Cronin

Fitch



M. Merck - Nikhef

Lo specchio CP non riflette esattamente!

- Se CP fosse esatta questi due decadimenti dovrebbero manifestarsi con la stessa probabilità

Invece sperimentalmente si trovano circa 1002 eventi con il

positrone per ogni 1000 eventi con l'elettrone ! **CP è violata!**

- All'alieno di Feynman potremmo suggerire di fare la stessa misura: se trova che il tipo di elettrone meno frequente è lo stesso degli atomi del suo corpo, allora è fatto come noi!

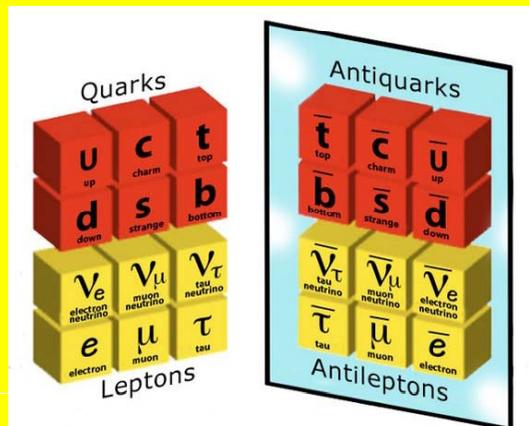
Se ci capitasse di incontrarlo potremmo stringergli tranquillamente la mano, ammesso che ne abbia una!



Violazione di CP nel Modello Standard

- Molto è stato fatto dalla scoperta di Cronin, Fitch e collaboratori
Lo studio della violazione di CP ha contribuito non poco allo sviluppo e all'affermazione del **Modello Standard (MS)** delle interazioni fondamentali.

Particelle fondamentali



Interazioni fondamentali

	quark	leptoni
▪ Forti	✓	
▪ Elettromagnetiche	✓	✓
▪ Deboli	✓	✓
▪ Gravitazionali	✓	✓

I quark legandosi tra loro formano il protone, il neutrone e centinaia di altre particelle, chiamate adroni. I pioni e i kaoni sono adroni.

- La violazione di CP è stata (finora) osservata **soltanto** nelle interazioni deboli degli adroni. Nel MS è ricondotta ad una **specificità proprietà dei quark**
- La violazione di CP assume un **ruolo importante in cosmologia**. Vediamo perché.

L'universo è fatto soltanto di materia?

- Sembra di sì! **Tutte le nostre osservazioni depongono a favore**
 - La luna certamente
 - Anche il sole e la nostra galassia
 - Ma anche le galassie e cluster lontani. Altrimenti:
 - **Radiazione di annichilazione dallo spazio interstellare**
 - **Raggi cosmici di alta energia fatti circa con uguale probabilità di materia e antimateria**



- Secondo la teoria cosmologica più accreditata (Big Bang) la materia è stata creata nei primissimi istanti dell'universo. **Conformemente con le teorie prevalenti in fisica delle particelle, materia e antimateria dovrebbero essere state create in uguale misura.**
Se così fosse, durante l'evoluzione l'annichilazione dovrebbe aver portato non soltanto alla scomparsa dell'antimateria ma anche della materia!

Perché di quest'ultima ce n'è ancora?

- Due possibilità
 - La prevalenza della materia sull'antimateria esisteva già all'inizio e si è conservata
 - Molto insoddisfacente
 - Dopo il Big Bang è accaduto qualcosa che ha originato tale prevalenza
 - Più plausibile. La violazione di CP potrebbe contribuire a dare una spiegazione

Le tre condizioni di Sakharov

La seconda possibilità fu considerata da Andrei Sakharov (nobel per la pace 1975) nel 1967: tre condizioni necessarie (ma non sufficienti)



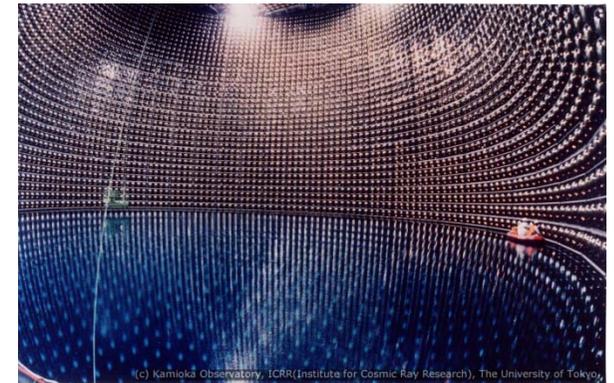
Sakharov

- I. Violazione di C e di CP*
- II. Materia non stabile. Il protone dovrebbe decadere, seppure molto raramente*
- III. Interazioni all'origine della dissimmetria avvenute in condizioni di non equilibrio termico*

- Decadimento del protone **mai osservato finora**

$$\tau_p > 10^{34} \text{ anni}$$

- La violazione di CP osservata **sembra non sufficiente**



- *Un particolare interesse è rivolto alla possibilità che una proprietà simile a quella dei quark esista anche tra i leptoni, in particolare tra i neutrini. Risultati preliminari sembrano suggerire che sia così ma bisogna ancora attendere.*

Ma questa è un'altra storia!

Materia-antimateria: una simmetria
imperfetta